

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2003-58907  
(P2003-58907A)

(43) 公開日 平成15年2月28日 (2003.2.28)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード* (参考)
G 0 6 T 15/70		G 0 6 T 15/70	B 3 C 0 0 7
B 2 5 J 5/00		B 2 5 J 5/00	C 5 B 0 5 0
13/00		13/00	Z

審査請求 有 請求項の数10 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2001-242435 (P2001-242435)

(22) 出願日 平成13年8月9日 (2001.8.9)

(71) 出願人 391012327

東京大学長

東京都文京区本郷7丁目3番1号

(72) 発明者 中村 仁彦

東京都江戸川区北篠崎2-24-10

(72) 発明者 山根 克

埼玉県川越市菅原町11-6-303

(74) 代理人 100072051

弁理士 杉村 興作 (外1名)

Fターム(参考) 3C007 AS36 CS08 KT17 LV19 WA03

WA13 WC04

5B050 AA09 BA07 BA08 BA09 BA12

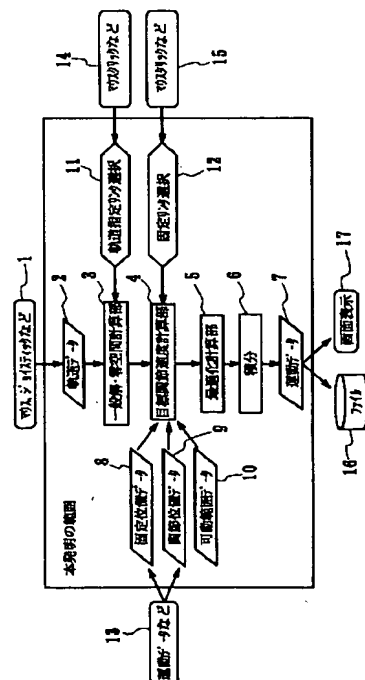
CA07 EA24 EA28 FA02 FA08

(54) 【発明の名称】 木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法

(57) 【要約】

【課題】 人間、動物、ロボット等のモデル化等によって作られた関節で接続された複数のリンクから成る木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法を提供する。

【解決手段】 任意の数の任意のリンクに拘束条件を与え、あるいは生成の途中において任意に拘束条件を付加又は解除することを許すことによって、これらの拘束条件に従う前記木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する。





# 【特許請求の範囲】

【請求項1】 人間、動物、ロボット等のモデル化等によって作られた、関節で接続された複数のリンクから成る木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、任意の数の任意のリンクに任意の数の拘束条件を与え、あるいは生成の途中において任意に拘束条件を付加又は解除することを許すことによって、これらの拘束条件に従う前記木構造リンク系のポーズ及び動作を生成することを特徴とする方法。

【請求項2】 請求項1に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記拘束条件が前記リンクの位置及び姿勢と、これらが変化する速度と角速度とを含むことを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項3】 請求項1又は2に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記拘束条件が、全部又は一部の関節が指定された前記運動範囲を超えないようにすることを含むことを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項4】 請求項3に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記関節が3自由度の球面関節を含み、その運動範囲を直感的に表現する方法を用いて球面関節が運動範囲を超えないようにすることを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項5】 請求項1、2、3又は4に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記拘束条件が、全部又は一部の自由度の関数値及び関節速度が与えられた目標関節値及び目標関節速度にできるだけ近くなることを含むことを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項6】 請求項1、2、3、4又は5に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、それぞれの拘束条件に対して理想状態との誤差に応じた復元力を考えることにより拘束条件を実現する方法。

【請求項7】 請求項1、2、3、4、5又は6に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記拘束条件に優先順位を設定することを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項8】 請求項7に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記拘束条件に従う前記木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する際に逆運動学計算を使用し、前記逆運動学計算の解に前記拘束条件の優先順位によって厳密さの要求と厳密さの緩和を許可し、前記解の特異点問題を解決するために特異点低感度運動分解法を用いることを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項9】 請求項1ないし8のいずれか1項に記載

の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法において、前記木構造リンク系が既存の運動データを有する場合に、運動するリンクへの前記拘束条件の付加及び解除を運動中の操作によって行えることを特徴とする木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法。

【請求項10】 請求項1ないし9のいずれか1項に記載の木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法によって複数のキーフレームを生成し、前記キーフレーム間の補間演算によって前記木構造リンク系の一連の動作を生成する方法。

## 【発明の詳細な説明】

### 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、人間、動物、ロボット等のモデル化等によって作られた、関節で接続された複数のリンクから成る木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法に関する。

### 【0002】

【従来の技術】 コンピュータグラフィックスのアニメーション、映画制作、ゲームなどに登場する人間や動物などの動作を表すデータや、ヒューマノイドなど多くの関節を持つロボットの動作を表すデータを生成する従来の技術は、

[1] Choi, K. J. and Ko, H. S. : "Online Motion Retargeting," the Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 11, pp. 223-235, 2000.

[2] Gleicher, M. and Litwinowicz, P. : "Constraint-based Motion Adaptation," the Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 9, pp. 65-94, 1998.

[3] Lee, J. and Shin, S. Y. : "A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing for Human-like Figures," Proceedings of SIGGRAPH '99, pp. 39-48, 1999.

などの論文において発表されている。これらはいずれも、予め得られたモーションキャプチャデータをリンク長さなどが異なるさまざまな人間型の木構造リンク系に当てはめたり、運動の特徴を保存したまま新しい運動を作り出したりすることを目的として、最適化計算によって足が地面に対して滑らないなどの拘束条件を満足する運動を計算する技術である。

【0003】 上記参考文献[1]に記載の技術では、末端リンクの位置を固定しながら各関節角がそれぞれ与えられた目標値にできるだけ近くなる運動を計算している。文献[2]に記載の技術では、拘束条件が運動全体にわたって滑らかになるように、大域的な最適化を行って拘束条件を満たす運動を計算している。文献[3]に記載の技術では、拘束条件を階層的なスプライン関数で表現することによって、拘束条件を満足したまま体の一部の姿勢を変更することを可能にしている。最適化計算は文献[2]の技術と同様に運動全体に行っている。



## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】上記文献〔1〕、〔2〕及び〔3〕の技術に関して、モーションキャプチャデータなどの参照運動が必要である。従来に比べるとモーションキャプチャに要するコストも低減され、キャプチャデータのライブラリも市販されるようになってきているが、ライブラリに含まれていない動作が必要になるたびに新しい動作をキャプチャしなければならない、さらに同じライブラリから作られた動作は類似したものになりがちであり、自分の好みに合わせて動作を修正するには多大な時間と努力が必要になるといった欠点があった。

【0005】上記文献〔2〕及び〔3〕の技術に関して、大域的な最適化計算を行っているため、入力が逐次入ってくるようなリアルタイムの、あるいはインタラクティブな運動生成には適用できないという欠点があった。

【0006】上記文献〔1〕の技術に関して、末端リンク以外のリンクに拘束条件を付加すると、計算結果が発散してしまうことがあるという欠点があった。また、多数のリンクを固定しようとする解が得られないことがあるという欠点があった。

【0007】市販のコンピュータグラフィックスソフトウェアには、アニメーション制作のためにリンク構造体の先端リンクの位置を指定するためのインタフェースが備えられているが、これらでは腕や脚など木構造リンク系の1本の枝に相当する部分リンク列の関節角を計算するだけで、木構造リンク系全体のポーズを変化させることができないため、自然なポーズ作成が困難であるという欠点があった。

【0008】固定するリンクとしては、従来はリンク列の先端リンクしか指定できなかった。これは、固定される複数のリンク間に少数の関節しかない場合にはそれぞれの拘束の間に矛盾が生じ、数値計算に破綻をきたすためである。

【0009】球面関節の可動範囲は、従来の技術では考慮されていなかった。

【0010】本発明は、モーションキャプチャデータなど既存の運動データがなくても、例えば多数の関節及び多数（例えば20以上）の自由度を持つヒューマンフィギュアに対して、1個又は複数のリンクの軌道を指示するという簡単な操作で人間らしい全身運動をリアルタイムに生成することができるようにするために、あるいはモーションキャプチャデータ等の運動データがある場合には、上記の操作でそれらの修正や再利用を可能にするために、上記従来の技術の欠点を克服した木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法を提供することを目的とする。

## 【0011】

【課題を解決するための手段】請求項1に記載の第1発

明は、任意の数の任意のリンクに任意の数の拘束条件を与え、あるいは生成の途中において任意に拘束条件を付加又は解除することを許すことによって、これらの拘束条件に従う前記木構造リンク系のポーズ及び動作を生成することを特徴とする。

【0012】請求項2に記載の第2発明は、前記拘束条件が前記リンクの位置及び姿勢と、これらが変化する速度及び角速度とを含むことを特徴とする。

【0013】請求項3に記載の第3発明は、前記拘束条件が、関節が指定された運動範囲を超えないようにすることを含むことを特徴とする。

【0014】請求項4に記載の第4発明は、前記関節が3自由度の球面関節を含み、その運動範囲を直感的に表現する方法を用いて球面関節が運動範囲を超えないようにすることを特徴とする。

【0015】請求項5に記載の第5発明は、前記拘束条件が、全部又は一部の自由度の関数値及び関節速度を与えられた目標関節値及び目標関節速度にできるだけ近くなることを含むことを特徴とする。

【0016】請求項6に記載の第6発明は、それぞれの拘束条件に対して理想状態との誤差に応じた復元力を考えることにより拘束条件を実現することを特徴とする。

【0017】請求項7に記載の第7発明は、前記拘束条件に優先順位を設定することを特徴とする。

【0018】請求項8に記載の第8発明は、前記拘束条件に従う前記木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する際に逆運動学計算を使用し、前記逆運動学計算の解に前記拘束条件の優先順位によって厳密さの要求と厳密さの緩和を許可し、前記解の特異点問題を解決するために特異点低感度運動分解法を用いることを特徴とする。

【0019】請求項9に記載の第9発明は、前記木構造リンク系が既存の運動データを有する場合に、運動するリンクへの前記拘束条件の付加及び解除を運動中の操作によって行えることを特徴とする。

## 【0020】

【発明の効果】上記本発明によれば、モーションキャプチャデータ等の運動データを前提とはせず、計算のみによって運動を生成することができ、既存の運動データの加工にも利用することができ、運動全体にわたる最適化を行わないため、リアルタイムで入力を受付ながら運動を生成することができ、リンクの軌道を指定することにより、例えばもののある位置から別の位置へ動かすような運動が容易に実現できる。

【0021】第2発明によれば、固定リンクを設定することにより、接触等により環境から拘束を受けている場合等の運動の生成が容易になる。

【0022】第3発明および第4発明によれば、関節可動範囲を設定することにより、人間、動物、ロボット等としてありえない姿勢になるのを防ぐことができる。また、体の硬さ、柔らかさを調節することができる。



【0023】第5発明によれば、ある既存の運動を少し変化させた運動や、周期運動の生成が容易になる。

【0024】第6発明によれば、さまざまな拘束を局所的な情報だけで実現することができるようになり、リアルタイム・インタラクティブな運動の生成が可能になる。

【0025】第7発明および第8発明によれば、拘束条件は任意の位置に、任意の数だけ設定可能で、それらが矛盾する場合でも予め設定された優先度に応じて妥当な運動を計算することができる。

【0026】第9発明によれば、すでに運動データが存在する場合は、それを元にして同様な操作で新たな運動を作り出すことができる。

【0027】利用分野としては、コンピュータグラフィックスのアニメーション、映画制作、ゲーム、ヒューマノイドの動作生成などが考えられる。いずれの分野においても単独のソフトウェアとして利用するほかに、なんらかのグラフィカルインタフェースを付加したソフトウェアの計算エンジンや、既存のコンピュータグラフィックスソフトウェアのプラグインとしての利用が可能である。

【0028】歩行運動などの周期運動では、1周期ごとに同じ姿勢になることが重要である。この点も目標関節値の導入により実現されている。目標関節値を設定することにより、拘束を与えたリンクの運動軌道が周期的であれば、全身の運動も周期的になる。

【0029】以上の効果を総合すると、従来は訓練を受けたプロのアニメーターが多くの時間と労力をかけて制作したり、高価な機材を使って実際の人間や動物の運動からキャプチャしたりすることによってしか得られなかった人間、動物、ロボット等の木構造リンク系モデルの自然な全身運動を、誰でも簡単な操作で作成することができるようになる。また、リアルタイムでの運動生成が可能であることから、ゲームなど高いインタラクティブ性を要求される分野でも、状況に応じて多様な運動を生成するための計算エンジンとして利用することができる。

【0030】ロボティクス分野では、ヒューマノイドなど多くの関節を持つロボットの操作を行うための直感的なインタフェースとして応用できる効果がある。このようなロボットは操作すべき変数が多いため、インタラクティブな操作を行うためのインタフェースとしては歩く方向を指示するなど、これまで限られたものしか実現されていない。本発明により、幅広い場面で多様な運動をロボットに指示できるようになる。

【0031】また、上記本発明による木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法によって複数のキーフレームを生成することができる。このため、本発明はキーフレームアニメーションなど前記キーフレーム間の補間演算によって前記木構造リンク系の一連の動作を生成する方法にも関する。

【0032】

【発明の実施の形態】図1は、本発明による木構造リンク系のポーズ及び動作を生成する方法を適用することができるモデルの一例を示す図である。この人間型木構造リンク系モデルは、例えば、コンピュータグラフィック内に登場する人物であり、又は、ヒューマノイドなど多くの関節を持つロボットの操作を行うための直感的なインタフェースに使用されるモデルである。このモデルでは、複数のリンクが、複数の3自由度の球面関節と、複数の1自由度の回転関節とで接続されている。

【0033】本発明による動作データ生成方法を実行するシステムは、例えば、計算機上で実行する独立したソフトウェアまたは他のソフトウェアから呼び出される計算エンジン、プラグインとして実装することができる。図2は、本発明による動作データ生成方法のフローチャートである。この図には各入出力、操作を外部から行うためのインタフェースの例も参考として含めたが、本発明の範囲は太線で囲まれた部分である。

【0034】本発明による動作データ生成方法を実行するシステムは、一般解・零空間計算部3、目標関節速度計算部4、最適化計算部5及び積分部6を具える。

【0035】外部インタフェースであるマウスのクリック等(14, 15)により、表示装置(図示せず)に表示された木構造リンク系において軌道を指定したいリンクと、空間中に固定したいリンクとを選択し、軌道指定リンク選択データ11及び固定リンク選択データ12を入力する。これらのリンクは以降のデータのリアルタイム生成中に変更することも可能である。軌道指定リンク選択データ11を、一般解・零空間計算部3に入力する。次に、軌道を指定したいリンクとして選択されたリンクの軌道データ(2)を、外部インタフェースであるマウスやジョイスティックの動きなど(1)により、一般解・零空間計算部3に入力する。一般解・零空間計算部3は、軌道を指定したリンクが与えられた軌道上を動くような関節速度の一般解と、そのリンクの軌道に影響を与えないで関節速度を変化させることのできる空間(零空間)とを計算し、関節速度の一般解の計算結果を目標関節速度計算部4に、零空間の計算結果を最適化計算部5に供給する。

【0036】目標関節速度計算部4に、固定リンク選択データ12も入力する。さらに、既存の運動データ等(13)から、位置を固定するリンクの位置データ(固定位置データ8)を、例えば既存の運動データにおけるリンク位置など(13)を使用して入力する。さらに、各関節の目標値である関節目標データ9を入力する。このデータとして、例えば既存の運動データにおける関節値(13)を使用してもよい。さらに、各関節の可動範囲を入力する。上記データを受けた目標関節速度計算部4は、現在の位置固定リンクの位置と関節角から、理想状態との誤差を計算し、それをフィードバックする目標



関節速度を計算し、その結果を最適化計算部5に入力する。

【0037】前記目標関節速度の計算結果を受けた最適化計算部5は、一般解・零空間計算部3において計算された零空間の中で、目標関節速度計算部4で計算された目標関節速度にできるだけ近い最適な関節速度を計算し、その結果を積分部6に供給する。

【0038】積分部6は、得られた関節速度を積分し、関節値のデータを得る。関節値の時系列データとリンク位置の時系列データを含む運動データを出力データとして、例えば、外部のファイル16への保存、又は、画面17へのグラフィックス表示のために出力する。

【0039】実際の運動生成の手順は以下のようになる。空間中の位置を固定したいリンク(a, b, c)をすべて選ぶ。軌道をリアルタイムに指定したいリンク(p)を選ぶ。必要ならば関節可動範囲を適宜設定する。すでに運動が与えられている場合にはそれを再生しながら、軌道を指定するリンクpに対して与える軌道を適当なインタフェースによって入力する。なお、このとき空間中の位置を固定したいリンクa, b, cに対しては元の運動における各時刻の位置を固定位置として与え、関節目標値としては元の運動における各時刻の関節値を与える。

【0040】このとき生成される運動は、任意数個のリンクを空間中の指示された位置に固定する(指定位置が時間変化する場合を含む)、関節角をなるべく目標値に近い値にする(目標値が時間変化する場合も含む)、関節が可動範囲を逸脱しない、など複数の拘束すべてまたは一部を満足するものとする。ただし、拘束条件はこれら3種類に制限されるわけではなく、同様の形式で表現できる拘束条件であればいくつでも組み込むことができる。

【0041】次に、本発明のより具体的な実施形態について説明する。本発明を利用した運動生成ソフトウェアでは、ユーザは適宜軌道を与えるリンクと位置を固定するリンクとを選択し、それぞれ軌道と位置とを与える、目標関節値や関節可動範囲を考慮した最適な運動が時々刻々計算される。図3は、このような運動生成ソフトウェアにおけるインタフェースの例を説明する図である。このようなインタフェースをピン/ドラッグインタフェースと呼ぶ。このインタフェースの基本的な機能は、a, b, c及びpで示すリンクのうちいくつかを空間中に固定(ピン止め)したまま別のリンクをユーザの指示(ドラッグ)通りに動かすというものである。

【0042】上記ピン/ドラッグによる動作生成が目標とするのは以下のような動作の生成である。

- (1) ドラッグリンクが指定された軌道上を動く。
- (2) ピン止めリンクが指示された位置に固定される。
- (3) 各関節が可動範囲を逸脱しない。
- (4) 各関節値が与えられた目標値になるべく近づく。

これは多数の拘束条件が加わった逆運動学計算にあたり、解析的に解くのは明らかに非現実的である。また、各拘束条件間の矛盾のため、厳密解が存在しないことも十分考えられる。例えば、ピン止めされた位置で決まる可動範囲の外にリンクがドラッグされると、条件

(1)、(2)を同時に満足する解は存在しない。

【0043】本発明による方法の一実施形態においては、まず逆運動学問代においてはヤコビアンを用いた数値解法を適用する。さらに拘束条件間の矛盾に対応するため4つの拘束条件を2段階の優先順位に分けて考える。上述した2つの拘束条件のうち、ドラッグリンクに関する拘束条件(1)に上位の優先順位を与え、(1)に影響を与えない零空間の中で他の3つの拘束条件をできるだけ満足する解を探す。したがって、拘束条件(1)と他の拘束条件の間に矛盾がある場合には(1)を優先し、他を無視する。

【0044】拘束条件(2)～(4)の間に矛盾がある場合、すなわち(1)の零空間の中で最適解を探すときにランク落ちした行列が現れた場合に対処するため、特異点付近でも誤差を許すことによって極端に大きな解を出さない特異点低感度運動分解行列(SR-inverse)(詳細には、中村、花房による論文「関節形ロボットアームの特異点低感度運動分解」計測自動制御学会論文集、453～459ページ、1984年を参照されたい)を用いる。これによって任意の数のピン、可動範囲および目標値を与えることができ、これらの間に矛盾がある場合には予め与えられた重みに応じて誤差が配分されるため不自然な動作は出力されない。また、矛盾が解消されたときには拘束条件を満足する姿勢に復帰するように、SR-inverseを用いることによって発生する誤差をフィードバックするコントローラを組み込む。

【0045】木構造リンク系の関節値に関するリンクiの位置のヤコビアンは以下のように定義される。

【数1】

$$J_i \triangleq \frac{\partial r_i}{\partial \theta} \quad (1)$$

ここで $r_i$ はリンクiの位置、 $\theta$ は木構造リンク系の関節値を並べたベクトル、 $J_i$ が $\theta$ に関するリンクiの位置のヤコビアンである。このヤコビアンを効率的に計算する方法については、例えば、D. E. オリンおよびW. W. シュレイダーによる論文「ロボットマニピュレータに関するヤコビアンの効率的な計算(Efficient Computation of the Jacobian for Robot Manipulators)」インターナショナルジャーナルオブロボティクスリサーチ、vol. 3、No. 4、66～75ページ、1987年を参照されたい。ヤコビアンを用いて、リンクiの速度と関節速度の関係は以下のように表される。

【数2】

$$\dot{r}_i = J_i \dot{\theta} \quad (2)$$



人間、動物、ロボット等の木構造リンク系の各リンクに番号を付けて呼ぶが、その基準になるリンクをルート・リンクという。ルート・リンクが慣性座標系に固定されていないとき、その並進速度および角速度も

【外1】

$$\dot{\theta}$$

に含まれている。 $J_i$ が正方正則であれば、

【数3】

$$\dot{\theta} = J_i^{-1} \dot{r}_i \quad (3)$$

によってリンク*i*の速度から関節速度を求めることができる。しかし、人間、動物、ロボット等の木構造リンク系は通常30以上の自由度を持つため、 $J_i$ が正方でなく冗長性を持つ。このとき式(2)の一般解は擬似逆行列

【外2】

$$J_i^{\dagger}$$

をもちいて、

【数4】

$$\dot{\theta} = J_i^{\dagger} \dot{r}_i + (E - J_i^{\dagger} J_i) y \quad (4)$$

と表される。ここでEは単位行列、 $y$ は任意のベクトルである。式(4)右辺第2項が冗長性による零空間を表し、これを用いてリンク*i*の速度を変えずに他の拘束条件を満足する解を探すことができる。

【0046】以下に、本発明による方法の一実施形態における動作の生成のための計算について説明する。まず、ドラッグリンクを指定された位置に動かすことができる関節速度の一般解を求める。ドラッグリンクが指示された軌道の位置

【外3】

$$r_P^{ref}, \text{速度 } \dot{r}_P^{ref}$$

に追従するような【外1】の一般解を求める。 $r_P$ をドラッグされるリンクの現在位置とすると、フィードバックを考慮した目標速度は次式で計算される。

【数5】

$$\dot{r}_P^d = \dot{r}_P^{ref} + K_P(r_P^{ref} - r_P) \quad (5)$$

【外7】

$$\dot{p}_{aux}$$

と関節速度【外1】の間には式(2)と同様に以下のような関係がある。

【数10】

$$\dot{p}_{aux} = J_{aux} \dot{\theta} \quad (10)$$

$J_{aux}$ の計算については後述する。任意ベクトル $y$ は以下のように計算する。まず $p_{aux}$ の目標速度

ここで $K_P$ は正定値のゲイン行列である。

【外4】

$$\dot{\theta} \text{ と } \dot{r}_P$$

の関係は、ドラッグされるリンク位置の関節値に関するヤコビアン $J_P$ を用いて、

【数6】

$$\dot{r}_P = J_P \dot{\theta} \quad (6)$$

と表される。目標速度

【外5】

$$\dot{r}_P^d$$

を実現する関節速度【数1】の一般解は次式で計算される。

【数7】

$$\dot{\theta} = J_P^{\dagger} \dot{r}_P^d + (E - J_P^{\dagger} J_P) y \quad (7)$$

ここでフィードバック制御を行っているのは積分誤差を補償するためである。また通常の擬似逆行列の代わりに重み付き擬似逆行列を用いると、各関節の「硬さ」、つまり動き易さや動き難さを調節することができる。

【0047】その他の拘束についての計算を説明する。

式(7)を、

【数8】

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_0 + W y \quad (8)$$

と書き換える。ここで

【外6】

$$W \triangleq E - J_P^{\dagger} J_P, \quad \dot{\theta}_0 \triangleq J_P^{\dagger} \dot{r}_P^d$$

である。ピン止めされたリンクが $N_F$ 個あり、それらの位置が $r_{Fi}$  ( $i=1, \dots, N_F$ )で表されているとする。また目標関数値が与えられた関節が $N_D$ 個あり、それらの目標関節値が $\theta_D$ で表されているとする。 $N_L$ 個の関節が可動範囲を超え、それらの関節値が $\theta_L$ で表されているとする。 $N_L$ は動作中いつでも変化する。これらを用いて、ベクトル $p_{aux}$ を以下のように定義する。

【数9】

$$p_{aux} \triangleq (r_{F1}^T \dots r_{FN_F}^T \theta_D^T \theta_L^T)^T \quad (9)$$

【外8】

$$\dot{p}_{aux}^d$$

を後述する方法で計算する。式(8)を式(10)に代入すると、

【数11】

$$\dot{p}_{aux} = \dot{p}_{aux}^d + J_{aux} W y \quad (11)$$



が得られる。ここで、

【外9】

$$\dot{p}_{aux}^0 \triangleq J_{aux} \dot{\theta}_0$$

である。

【外10】

$$S \triangleq J_{aux} W \text{ と } \Delta \dot{p}_{aux} \triangleq \dot{p}_{aux}^d - \dot{p}_{aux}^0$$

を用いて以下の簡単な形の式に変形する。

【数12】

$$S y = \Delta \dot{p}_{aux} \quad (12)$$

Sはフルランクであるとは限らないので、この方程式を解くためにSR-inverseを用いる。SのSR-inverseをS\*と表すと、yは次式のように計算できる。

【数13】

$$y = S^* \Delta \dot{p}_{aux} \quad (13)$$

関節速度

【外1】はこれを式(8)に代入して得られ、さらにそれを積分すると各フレームの関節角データが得られる。

【0048】上述したJauxの計算について説明する。rFiの関節値に関するヤコビアンをJFi (i = 1, ..., NF) で表すと、ピン止めされたすべてのリンクに対して

【数14】

$$\dot{r}_{Fi} = J_{Fi} \dot{\theta} \quad (14)$$

が成り立つ。目標関節値が与えられた関節について、その速度

【外11】

$$\dot{\theta}_D \text{ と } \dot{\theta}$$

の関係は次式のように表される。

【数15】

$$\dot{\theta}_D = J_D \dot{\theta} \quad (15)$$

ここでJDはθDの第i番目の関節がθの第j番目の関節に対応するとき、第(i, j)要素が1、それ以外るとき0になるような行列である。同様に、

【外12】

$$\dot{\theta} \text{ と } \dot{\theta}_L$$

の速度との関係は、

【数16】

$$\dot{\theta}_{Li}^d = \begin{cases} K_{Li}(\theta_{Li}^{max} - \theta_{Li}) & \text{if } (\theta_{Li} > \theta_{Li}^{max}) \\ K_{Li}(\theta_{Li}^{min} - \theta_{Li}) & \text{if } (\theta_{Li} < \theta_{Li}^{min}) \end{cases} \quad (20)$$

ここでθLmaxとθLminはそれぞれ関節角の最大値と最小値を表し、KLjは正のゲインである。式(19)および(20)は1自由度関節にのみ適用できる。以下に球面関節の取り扱いについて述べる。

【0050】まず、球面関節の目標関節値について説明

$$\dot{\theta}_L = J_L \dot{\theta} \quad (16)$$

と表される。ここでJLはθLの第i番目の関節がθの第j番目の関節に対応するとき第(i, j)要素が1、それ以外るとき0になるような行列である。以上の行列をまとめて、Jauxは次のような形になる。

【数17】

$$J_{aux} = \begin{pmatrix} J_{Fi} \\ \vdots \\ J_{FP} \\ J_D \\ J_L \end{pmatrix} \quad (17)$$

JFi、JP、JLの球面関節に対応する部分については後述する。

【0049】上述した

【外13】

$$\dot{p}_{aux}^d$$

の計算について説明する。ピン止めされたリンクの目標速度

【外14】

$$\dot{r}_{Fi}^d$$

は次式で計算される。

【数18】

$$\dot{r}_{Fi}^d = K_{Fi}(\mathbf{r}_{Fi}^{ref} - \mathbf{r}_{Fi}) \quad (18)$$

ここでrFifrefはピンの位置、KFjは正定値のゲイン行列である。目標関節値が与えられた関節の目標速度

【外15】は、

$$\dot{\theta}_D^d$$

【数19】

$$\dot{\theta}_D^d = K_D(\theta_D^{ref} - \theta_D) \quad (19)$$

と計算される。ここでθDrefは目標関節値を並べたベクトル、KDは正定値のゲイン行列である。可動範囲を超えた関節の目標速度は次のように計算する。

【数20】

する。球面関節の関節値Rjと関節速度ωjは、それぞれ親リンク座標系で表された3×3の回転行列とその角速度で定義する。球面関節に対して目標関節値RDj ∈ R3×3が与えられると、目標速度は以下のようにして得られる。まず現在の関節値Rjと目標の関節値RDj



の間の誤差ベクトル  $e_i$  を、

$$e_i = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} \Delta R_i(1,2) - \Delta R_i(2,3) \\ \Delta R_i(1,3) - \Delta R_i(3,1) \\ \Delta R_i(2,1) - \Delta R_i(3,2) \end{pmatrix} \quad \text{【数21】} \quad (21)$$

$$\Delta R_i \triangleq R_{D_i} R_i^T \quad (22)$$

によって計算する。ここで  $\Delta R_i(m, n)$  は  $\Delta R_i$  の第  $(m, n)$  要素を示す。次に、目標角速度  $\omega_{D_i} d_i$  を、

$$\omega_{D_i}^d = -K_{D_i} e_i \quad \text{【数22】} \quad (23)$$

によって計算する。ここで、 $K_{D_i}$  は正定値のゲイン行列である。球面関節に対しては、式(21)～式(23)が式(19)の代わりに用いられる。球面関節に対応して  $J_{F_i}$ 、 $J_{D_i}$ 、 $J_{L_i}$  の一部となるヤコビアンは、3列からなり、それぞれの列が  $x$ 、 $y$ 、 $z$  の周りの回転に対応する。各列はそれぞれ対応する方向を軸とする回転関節と同様に計算できる。

【0051】次に、球面関節の関節可動範囲について説明する。球面関節は3つの自由度を持つので、その可動範囲は3次元空間中の領域として表現される。姿勢の表現にはさまざまな方法があり、適切な方法を選択することが計算速度の向上に重要である。例えば、よく使われるオイラー角を姿勢表現に用いると、非線形性のために可動範囲が非常に複雑な形状となり、結果的に計算速度は落ちてしまう。ここでは球面関節の可動範囲を直感的に理解しやすく表現する方法について述べる。図4に示すように、リンクの方向を表す2つのパラメータと、ひねり角を表す1つのパラメータを合わせた計3個のパラメータを用いて球面関節可動範囲を表現する。 $R_i$  が単位行列のときのリンクの方向を単位ベクトル  $d_i^0$  で表す。実際のリンクの方向  $d_i$  は図5のように  $d_i^0$  を  $d_i^0$  に鉛直な平面に含まれるベクトル  $a_i$  の周りに回転することで得られる。 $a_i$  の長さは回転角を  $\gamma_i$  とおいたとき  $\sin(\gamma_i/2)$  とする。ひねり角  $\alpha$  は、 $R_i$  が単位行列の状態から  $a_i$  の周りに回転して得られるフレームを  $R_i$  と一致させるために必要な回転角として定義される。以上から、球面関節が取り得るすべての姿勢は  $d_i^0$  を軸とする半径1、高さ  $2\pi$  の円柱状に含まれることになる。本実施形態においては、すべての球面関節に対して  $d_i^0 = (1\ 0\ 0)^T$  とし、したがって  $a_i$  は  $yz$  面内に含まれる。すなわち  $a_i = (0\ a_y\ a_z)^T$  と表される。したがって、可動範囲は図6のように  $(a_y, a_z, \alpha)$  空間中の  $\alpha$  軸に平行な軸を持つ柱状の形になる。 $a_y, a_z, \alpha$  は次のように計算する。 $d_i^0 = (1\ 0\ 0)^T$  より、

【数23】

$$d_i = R_i d_i^0 = (R_i(1,1)\ R_i(2,1)\ R_i(3,1))^T \quad (24)$$

である。よって  $a_y, a_z$  は、

【数24】

$$a_y = -\frac{R_i(3,1)}{\sqrt{2(1+R_i(1,1))}} \quad (25)$$

$$a_z = \frac{R_i(2,1)}{\sqrt{2(1+R_i(1,1))}} \quad (26)$$

と求められる。 $a_i$  周りの回転を行った後の座標系と  $R_i$  の  $x$  軸は一致しているので、ひねり角  $\alpha$  はそれらの  $y$  軸と  $z$  軸のなす角から求められる。式(25)と式(26)は  $\gamma_i = \pm\pi$  のとき特異点となるが、通常は可動範囲の外にあるので実際は問題にならない。

【0052】ある姿勢に対応する3つのパラメータが求まったら、次にそれが可動範囲内にあるかどうかを判定する。図6のような可動範囲を柱状多面体として表すことで効率的に計算できる。本実施形態においては、 $a_y - a_z$  平面内の可動範囲を三角形の集合で、ひねり角  $\alpha$  の可動範囲を三角形の各頂点における上限値および下限値でそれぞれ表す。このような形状に対して、可動範囲内外の判定は以下のように行う。まず、 $(a_y, a_z, 0)$  が含まれる三角形を探し、見つからなければ可動範囲外である。見つかった場合は、さらに  $(a_y, a_z, \alpha)$  が上下限内にあるかどうかを調べる。可動範囲外であることがわかったら、それを可動範囲内に戻すための目標関節速度〔外7〕を計算する。そのため、各球面関節に対して基準姿勢  $R_{s_i}$  を予め与えておき、 $R_{s_i}$  へ向かうための目標角速度  $\omega_{L_i}$  を計算する。これは  $R_{s_i}$  を式(22)の  $R_{D_i}$  へ、 $\omega_{L_i}$  を式(23)の  $\omega_{D_i}$  へそれぞれ代入することによって行う。

【0053】ここまで説明した実施形態では、ピンの位置や目標関節値が時間変化しないと仮定していた。しかし、それらの時間変化を含むように拡張するのは以下に説明するように容易である。これによってモーションキャプチャなど他の手段で得られた動作をリアルタイムで編集し、新たな動作を生成することができる。拡張に必要なのは以下の2つである。

・参照運動におけるピンの位置  $r_{F_i}^{ref}$ 、速度〔外16〕



$$\dot{r}_{Fi}^{ref}$$

を順運動学計算によって求め、式(18)の代わりに次式を用いる。

【数25】

$$\dot{r}_{Fi}^d = \dot{r}_{Fi}^{ref} + K_{Fi}(\dot{r}_{Fi}^{ref} - \dot{r}_{Fi}) \quad (27)$$

・目標関節値と目標関節速度

【外17】

$$\dot{\theta}_D^{ref}$$

として参照運動における関節値と関節速度を使い、式(19)の代わりに次式を用いる。

【数26】

$$\dot{\theta}_D^d = \dot{\theta}_D^{ref} + K_D(\dot{\theta}_D^{ref} - \dot{\theta}_D) \quad (28)$$

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明による動作データ生成方法によって動作データを生成するヒューマンフィギュアの一例を示す図である。

【図2】 本発明による動作データ生成方法を実現するプログラムのフローチャートである。

【図3】 本発明による動作データ生成方法をヒューマ

ンフィギュアに適用している様子を説明する図である。

【図4】 球面関節の関節可動範囲を示す図である。

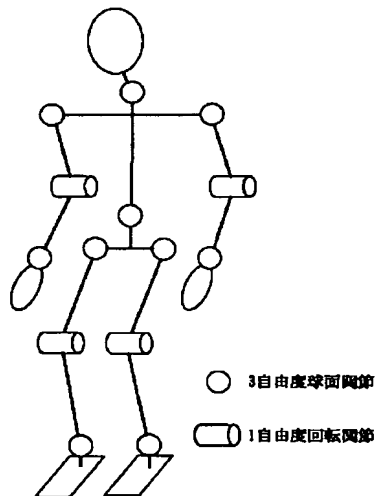
【図5】 球面関節のリンクパラメータを図式的に示す図である。

【図6】 (ay, az, a)空間に投影した球面関節の可動範囲を示す図である。

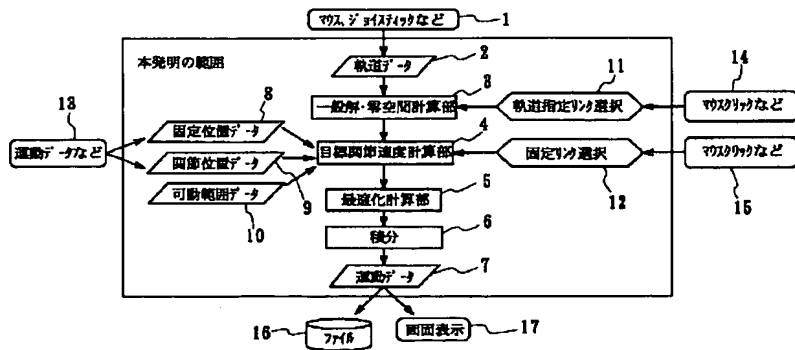
【符号の説明】

- 1、14、15 外部インターフェース
- 2 軌道データ
- 3 一般解・零空間計算部
- 4 目標関節速度計算部
- 5 最適化計算部
- 6 積分部
- 7 運動データ
- 8 固定位置データ
- 9 関節位置データ
- 10 可動範囲データ
- 11 軌道指定リンク選択データ
- 12 固定リンク選択データ
- 13 既存の運動データ
- 16 ファイル
- 17 画面表示

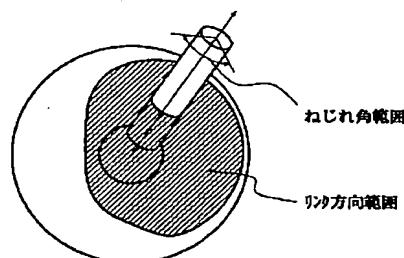
【図1】



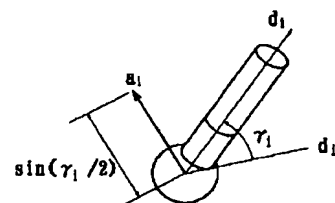
【図2】



【図4】

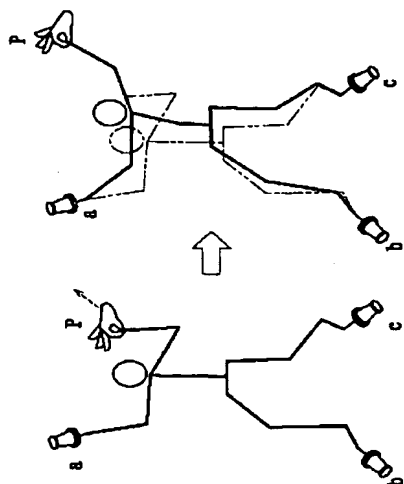


【図5】

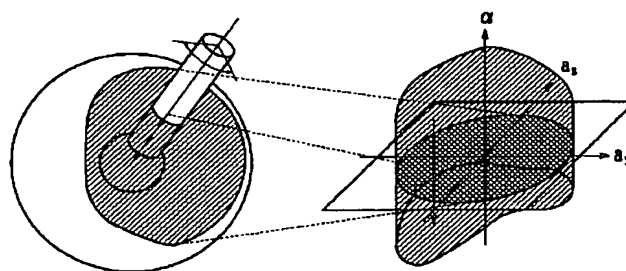




【図3】



【図6】





# PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-058907

(43)Date of publication of application : 28.02.2003

---

(51)Int.Cl. G06T 15/70

B25J 5/00

B25J 13/00

---

(21)Application number : 2001- (71)Applicant : UNIV TOKYO  
242435

(22)Date of filing : 09.08.2001 (72)Inventor : NAKAMURA YOSHIHIKO  
YAMANE KATSU

---

## (54) METHOD FOR GENERATING POSE AND MOTION IN TREE STRUCTURE LINK SYSTEM

### (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method for generating poses and motions in a tree structure link system consisting of a plurality of links which are connected with joints created by modeling, etc., of humans, animals and robots, etc.

SOLUTION: The poses and the motions in the tree structure system are generated according to constraining conditions by providing the constraining conditions to the optional number of optional links or permitting optional addition or release of the constraining conditions halfway of generation.

---

## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 09.08.2001



[Date of sending the examiner's decision of rejection] 14.09.2004

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection] 2004-021383

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection] 14.10.2004

[Date of extinction of right]

---

## CLAIMS

---

[Claim(s)]

[Claim 1] In the approach of generating the pause of a tree structure link system and actuation which were made by modeling of human being, an animal, a robot, etc., which were connected at the joint and which consist of two or more links The approach characterized by generating the pause of said tree structure link system which follows these constraints by allowing giving the constraint of the number of arbitration to the link of the arbitration of the number of arbitration, or setting in the middle of generation, and adding or canceling a constraint to arbitration, and actuation.

[Claim 2] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by said constraint containing the location of said link and a posture, and the rate from which these change and angular velocity in the approach of generating the pause of a tree structure link



system according to claim 1, and actuation.

[Claim 3] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by including making it said constraint not exceed said movement range where all or some joints were specified in the approach of generating the pause of a tree structure link system according to claim 1 or 2, and actuation.

[Claim 4] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by making it a spherical-surface joint not exceed the movement range using the approach said joint expresses the movement range intuitively including the spherical-surface joint of three degrees of freedom, in the approach of generating the pause of a tree structure link system according to claim 3, and actuation.

[Claim 5] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by including that said constraint becomes as close to the target joint value and target joint rate to which all, or some the function values and joint rates of a degree of freedom were given as possible in the approach of generating the pause of a tree structure link system according to claim 1, 2, 3, or 4, and actuation.

[Claim 6] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by realizing a constraint in the approach of generating the pause of a tree structure link system according to claim 1, 2, 3, 4, or 5, and actuation by considering the stability according to an error with an ideal condition to each constraint.

[Claim 7] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by setting priority as said constraint in the approach of generating the pause of a tree structure link system according to claim 1, 2, 3, 4, 5, or 6, and actuation.

[Claim 8] In the approach of generating the pause of a tree structure link system according to claim 7, and actuation In case the pause of said tree structure link system according to said constraint and actuation are generated, reverse kinematics count is used. How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by using a singular point low sensibility movement part solution method in order to permit



the demand of strictness, and relaxation of strictness to the solution of said reverse kinematics count by the priority of said constraint and to solve the singular point problem of said solution.

[Claim 9] How to generate the pause of a tree structure link system and actuation which are characterized by the ability to perform addition and discharge of said constraint to the link which exercises by actuation under movement in the approach of generating the pause of the tree structure link system of a publication, and actuation in claim 1 thru/or any 1 term of 8, when said tree structure link system has the existing movement data.

[Claim 10] How to generate two or more key frames by the approach of generating the pause of the tree structure link system of a publication, and actuation in claim 1 thru/or any 1 term of 9, and generate a series of actuation of said tree structure link system by the interpolation operation between said key frames.

---

## DETAILED DESCRIPTION

---

### [Detailed Description of the Invention]

[0001]

[Field of the Invention] This invention relates to the approach of generating the pause of a tree structure link system and actuation which were made by modeling of human being, an animal, a robot, etc., which were connected at the joint and which consist of two or more links.

[0002]

[Description of the Prior Art] The data showing actuation of human being who appears in the animation of computer graphics, movie work, a game, etc., an animal, etc., The Prior art which generates the data showing actuation of a robot with many joints, such as a humanoid [1] Choi and KJ and Ko, H. S. : "Online Motion Retargetting and "the Journal of Visualization and Computer Animation and vol.11, -235, pp.223.[ 2000] [2] Gleicher, M.and Litwinowicz,



P. : "Constraint-based Motion Adaptation" the Journal of Visualization and Computer Animation, vol.9, pp.65-94, 1998.[3] Lee, J.and Shin, S.Y. : "A Hierarchical Approach to Interactive Motion Editing It is announced in papers, such as for Human-like Figures, "Proceedings of SIGGRAPH'99, pp.39-48, and 1999. Each of these is techniques which calculate movement with which are satisfied of a constraint without a guide peg slippery [ with optimization count ] to the ground for the purpose of applying the motion capture data obtained beforehand to the tree structure link system of various human molds with which link die length etc. differs, or making new movement, with the description of movement saved.

[0003] Movement to which each joint angle becomes as close to the desired value given, respectively as possible is calculated fixing the location of an end link to the above-mentioned bibliography [1] with the technique of a publication. Movement which performs global optimization and fills a constraint with a technique given in reference [2] so that a constraint may become smooth over the whole movement is calculated. With the technique given in reference [3], it makes it possible to change some bodily postures, with a constraint satisfied by expressing a constraint with a hierarchical spline function. Optimization count is carried out to the whole movement like the technique of reference [2].

[0004]

[Problem(s) to be Solved by the Invention] Motion capture data etc. need to be reference exercised about the technique of the above-mentioned reference [1], [2], and [3]. The capture of the actuation new [ although the cost which motion capture takes compared with the former is also reduced and capture library of data are also marketed increasingly ] whenever the actuation which is not included to a library is needed must be carried out, the actuation made from the still more nearly same library tends to become a similar thing, and the fault that great time amount and efforts were needed for correcting actuation according to liking of one was.

[0005] Since global optimization count was performed about the above-mentioned reference [2] and the technique of [3], there was a fault that it was the real time into which an input comes serially, or could not apply to



interactive movement generation.

[0006] When the constraint was added to links other than an end link about the technique of the above-mentioned reference [1], there was a fault that a count result might emit. Moreover, when it was going to fix much links, there was a fault that a solution might not be acquired.

[0007] Although commercial computer graphics software was equipped with the interface for specify the location of the tip link of the link structure for animation work , since the pause of the whole tree structure link system was not able to be changed , there was a fault that natural pause creation was difficult at these , only by calculate the joint angle of the partial link train equivalent to one branch of a tree structure link system , such as an arm and a foot .

[0008] As a link to fix, only the tip link of a link train has been specified conventionally. This is for conflict arising between each constraint, when there is only a small number of joint among two or more links fixed, and causing a breakdown to numerical calculation.

[0009] The movable range of a spherical-surface joint was not taken into consideration by the Prior art.

[0010] Even if this invention does not have the existing movement data, such as motion capture data For example, a human figure skating with many joints and many (20 or more [ for example, ]) degrees of freedom is received. In order to enable it to generate the exercise of the whole body in character with human being on real time by easy actuation of showing the orbit of one piece or two or more links Or when there are movement data, such as motion capture data, in order to enable those corrections and reuse by the above-mentioned actuation, it aims at offering the approach of generating the pause of the tree structure link system which conquered the fault of the above-mentioned Prior art, and actuation.

[0011]

[Means for Solving the Problem] The 1st invention according to claim 1 is characterized by generating the pause of said tree structure link system according to these constraints, and actuation by allowing giving the constraint of the number of arbitration to the link of the arbitration of the number of



arbitration, or setting in the middle of generation, and adding or canceling a constraint to arbitration.

[0012] The 2nd invention according to claim 2 is characterized by said constraint containing the location of said link and a posture, and the rate and angular velocity from which these change.

[0013] The 3rd invention according to claim 3 is characterized by including making it said constraint not exceed the movement range where the joint was specified.

[0014] The 4th invention according to claim 4 is characterized by making it a solid sphere joint not exceed the movement range using the approach said joint expresses the movement range intuitively including the spherical-surface joint of three degrees of freedom.

[0015] The 5th invention according to claim 5 is characterized by including that said constraint becomes as close to the target joint value and target joint rate to which all, or some the function values and joint rates of a degree of freedom were given as possible.

[0016] The 6th invention according to claim 6 is characterized by realizing a constraint by considering the stability according to an error with an ideal condition to each constraint.

[0017] The 7th invention according to claim 7 is characterized by setting priority as said constraint.

[0018] The 8th invention according to claim 8 is characterized by using a singular point low sensibility movement part solution method, in order to use reverse kinematics count, to permit the demand of strictness, and relaxation of strictness to the solution of said reverse kinematics count by the priority of said constraint and to solve the singular point problem of said solution, in case the pause of said tree structure link system according to said constraint and actuation are generated.

[0019] The 9th invention according to claim 9 is characterized by the ability to perform addition and discharge of said constraint to the link which exercises by actuation under movement, when said tree structure link system has the existing movement data.

[0020]



[Effect of the Invention] Since it cannot be premised on movement data, such as motion-capture data, only count can generate movement, it can use also for processing of the existing movement data and optimization covering the whole movement does not perform according to above-mentioned this invention, movement can generate with reception for an input on real time, and movement which moves from a certain location to another location in a thing can realize easily by specifying the orbit of a link.

[0021] According to the 2nd invention, generation of movements when contact etc. has received constraint from the environment becomes easy by setting up a fixed link.

[0022] According to the 3rd invention and the 4th invention, it can prevent becoming the posture which has not been used as human being, the animal, the robot, etc. by setting up the joint movable range. Moreover, bodily hardness and softness can be adjusted.

[0023] According to the 5th invention, movement to which a little a certain existing movement was changed, and generation of periodic motion become easy.

[0024] According to the 6th invention, various constraint can be realized now only for local information, and generation of real time and interactive movement is attained.

[0025] According to the 7th invention and the 8th invention, a constraint can set only the number of arbitration as the location of arbitration, and even when they are contradictory, it can calculate appropriate movement according to the priority set up beforehand.

[0026] According to the 9th invention, when movement data already exist, it can carry out based on it and new movement can be made by the same actuation.

[0027] As a field of the invention, generation of the animation of computer graphics, movie work, a game, and a humanoid of operation etc. can be considered. The use as plug-in of the count engine of the software which it used as independent software also in which field, and also added a certain graphical interface, and the existing computer graphics software is possible.

[0028] It is important to become the same posture for every period in periodic



motion, such as locomotion. This point is also realized by installation of a target joint value. If the movement orbit of the link which gave constraint by setting up a target joint value is periodic, movement of the whole body will also become periodic.

[0029] A natural exercise of the whole body of tree structure link system models, such as human being and the animal which were obtained only when the animator of the pro who received training made, applying many time amount and efforts or carried out a capture from movement of actual human being or an animal using expensive equipments conventionally, and a robot, can be created now by actuation with easy anyone putting the above effectiveness together. Moreover, since movement generation on real time is possible, it can use as a count engine for the field of which high interactive nature, such as a game, is required to also generate various movements according to a situation.

[0030] In the robotics field, there is effectiveness applicable as an intuitive interface for operating a robot with many joints, such as a humanoid. Since there are many variables which should be operated among such robots, only what was restricted until now [, such as showing the direction along which he walks as an interface for performing interactive actuation, ] is realized. By this invention, various movements can be directed now to a robot in a broad scene.

[0031] Moreover, two or more key frames are generable by the approach of generating the pause of a tree structure link system and actuation by above-mentioned this invention. For this reason, this invention relates also to the approach of generating a series of actuation of said tree structure link system by the interpolation operation between said key frames, such as key frame animation.

[0032]

[Embodiment of the Invention] Drawing 1 is drawing showing an example of the model which can apply the approach of generating the pause of a tree structure link system and actuation by this invention. This human mold tree structure link system model is a person who appears for example, in a computer graphic, or is a model used for the intuitive interface for operating a



robot with many joints, such as a humanoid. With this model, two or more links are connected at the spherical-surface joint of two or more three degrees of freedom, and the rotation joint of two or more one degrees of freedom.

[0033] The system which performs the data generation method of operation by this invention can be mounted as the count engine called from the independent software or other software which are performed for example, on a computer, and plug-in. Drawing 2 is the flow chart of the data generation method of operation by this invention. Although the example of the interface for performing each I/O and actuation from the outside was also included in this drawing as reference, the range of this invention is the part surrounded by the thick wire.

[0034] the system which performs the data generation method of operation by this invention -- the general solution -- it has - null space count section 3, the objective function rate count section 4, the optimization count section 5, and the integral section 6.

[0035] The link which wants to specify an orbit by the click of the mouse which is an external interface etc. in the tree structure link system displayed on the display (not shown) (14 15), and a link to fix all over space are chosen, and the orbital appointed link select data 11 and the fixed link select data 12 are inputted. These links can also be changed during real-time generation of subsequent data. the orbital appointed link select data 11 -- the general solution -- it inputs into - null space count section 3. next, a motion (1) of the mouse and joy stick which are an external interface about the orbital data (2) of the link chosen as a link which wants to specify an orbit etc. -- the general solution -- it inputs into - null space count section 3. the general solution -- the - null-space count section 3 calculates the general solution of a joint rate which moves on the orbit to which the link which specified the orbit was given, and the space (null space) to which a joint rate can change without affecting the orbit of the link, and supply the count result of the general solution of a joint rate to the target joint rate count section 4, and it supplies the count result of null space to the optimization count section 5.

[0036] The fixed link select data 12 is also inputted into the target joint rate count section 4. Furthermore, the location data (fixed position data 8) of the



link which fixes a location are inputted from the existing movement data etc. using the link location (13) in the existing movement data etc. (13).

Furthermore, the Seki turning point label data 9 which are the desired value of each joint are inputted. As this data, the joint value (13) in the existing movement data may be used. Furthermore, the movable range of each joint is inputted. From the current location and current joint angle of a location fixed link, the target joint rate count section 4 which received the above-mentioned data calculates an error with an ideal condition, calculates the target joint rate which feeds it back, and inputs the result into the optimization count section 5. [0037] the optimization count section 5 which received the count result of said target joint rate -- the general solution -- in the null space calculated in - null space count section 3, the optimal joint rate possible nearest to the target joint rate calculated in the target joint rate count section 4 is calculated, and the result is supplied to the integral section 6.

[0038] The integral section 6 integrates with the obtained joint rate, and obtains the data of a joint value. It outputs for the preservation to the external file 16, or a graphics display on Screen 17 by using the movement data containing the time series data of a joint value, and the time series data of a link location as output data.

[0039] The procedure of actual movement generation is as follows. All links (a, b, c) to fix the location in space to are chosen. The link (p) which wants to specify an orbit as real time is chosen. If required, the joint movable range will be set up suitably. The orbit given to the link p which specifies an orbit is inputted with a suitable interface, reproducing it, when movement is already given. In addition, to the links a, b, and c to fix the location in space to at this time, the location of each time of day in the original movement is given as a fixed position, and the joint value of each time of day in the original movement is given as a Seki turning point label value.

[0040] Movement generated at this time shall satisfy two or more constraint of all -- making a joint angle into the value near desired value if possible (it containing, also when desired value carries out time amount change), and a joint does not deviate from the movable range -- or the part which fixes to the location where the link of arbitration some was directed in space (the case



where the specified location carries out time amount change is included).

However, a constraint is not necessarily restricted to these three kinds, and if it is a constraint which can be expressed in the same format, it is incorporable without limit.

[0041] Next, the more concrete operation gestalt of this invention is explained. In the movement generated software using this invention, if a user chooses the link which gives an orbit suitably, and the link which fixes a location and gives an orbit and a location, respectively, the optimal movement in consideration of a target joint value or the joint movable range will be calculated every moment. Drawing 3 is drawing explaining the example of the interface in such movement generated software. Such an interface is called a pin / DORAKKU interface. Fixing some all over space among the links shown by a, b, c, and p, (pinning) the fundamental function of this interface moves the link of an exception as the user directed (drag).

[0042] A target [ generation / by above-mentioned pin/drag / of operation ] is generation of the following actuation.

- (1) Move on the orbit as which the DORAKKU link was specified.
- (2) It is fixed to the location where the pinning link was directed.
- (3) Each joint does not deviate from the movable range.
- (4) If possible, approach the desired value to which each joint value was given.

As for this, it is clearly unreal to solve analytically in the reverse kinematics count which many constraints joined. Moreover, it is also enough considered for conflict between each constraint that a strict solution does not exist. For example, if a link is dragged out of the movable range decided in the location by which pinning was carried out, the solution which is satisfied with coincidence of conditions (1) and (2) does not exist.

[0043] In 1 operation gestalt of the approach by this invention, the numerical solution using a Jacobian is first applied in reverse kinematics question cost. Since it furthermore corresponds to conflict between constraints, four constraints are divided into two steps of priority, and are considered. The solution which satisfies other three constraints as much as possible in the null space which gives the priority of a high order to the constraint (1) about a drag link between two constraints mentioned above, and does not affect (1) is



looked for. Therefore, when conflict is between a constraint (1) and other constraints, priority is given to (1), and others are disregarded.

[0044] Constraint (2) When conflict is between - (4) (i.e., when looking for an optimum solution in the null space of (1) and the matrix which carried out rank omission appears), in order to cope with it, The singular point low sensibility movement decomposition matrix which does not take out an extremely big solution by allowing an error also near the singular point (SR-inverse) (in a detail) Nakamura, the paper "singular point [ of a joint form robot arm ] low sensibility movement decomposition" Society of Instrument and Control Engineers collected works by the flower cluster, 453-459 pages, and 1984 are referred to -- \*\*\*\* -- it uses. The pin, the movable range, and desired value of a number of arbitration can be given by this, and since an error is distributed according to the weight given beforehand when conflict is among these, unnatural actuation is not outputted. Moreover, when conflict is canceled, the controller which feeds back the error generated by using SR-inverse is incorporated so that it may return to the posture in which a constraint is satisfied.

[0045] The Jacobian of the location of the link i about the joint value of a tree structure link system is defined as follows.

[Equation 1]

$$\dot{r}_i = J_i \dot{\theta}$$

The vector with which  $r_i$  put the location of Link i in order and  $\theta$  put the joint value of a tree structure link system in order here, and  $J_i$  are the Jacobians of the location of the link i about  $\theta$ . Please refer to the paper "count (Efficient Computation of the Jacobian for Robot Manipulators)" international JANARUOBU robotics research with the efficient Jacobian about a robot manipulator by D.E. Orrin and W.W. Schrader, vol.3, No.4, 66-75 pages, and 1987 about the approach of calculating this Jacobian efficiently, for example. The relation between the rate of Link i and a joint rate is expressed as follows using a Jacobian.

[Equation 2]

$$\dot{r}_i = J_i \dot{\theta}$$



Although a number is numbered and invited to each link of tree structure link systems, such as human being, an animal, and a robot, the link which becomes the criteria is called root link. While the root link is not being fixed to inertial system, the advancing-side-by-side rate and angular velocity are also [External Character 1].

□:

It is alike and is contained. It is [Equation 3] if  $J_i$  is square regular.

□ -

A joint rate can be found from the rate of Link  $i$  as be alike. However, since tree structure link systems, such as human being, an animal, and a robot, usually have 30 or more degrees of freedom,  $J_i$  has not a square but redundancy. At this time, the general solution of a formula (2) is a false inverse matrix [outside 2].

□

Rice cake \*\*\*\*, [Equation 4]

□ -

It is expressed.  $E$  is a unit matrix and  $y$  is the vector of arbitration here. The 2nd term of the formula (4) right-hand side can express the null space by redundancy, and can look for the solution with which it is satisfied of others and a constraint, without changing the rate of Link  $i$  using this.

[0046] Below, the count for generation of the actuation in 1 operation gestalt of the approach by this invention is explained. First, the general solution of the joint rate which can be moved to the location which had the drag link specified is calculated. The orbital location where the drag link was directed [outside 3]

□ -

It is alike and the general solution of [outside 1] which is followed is calculated. If it is the current position of the link which has rP dragged, the target rate in



consideration of feedback will be calculated by the degree type.

[Equation 5]

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{K}_P \mathbf{e}$$

$\mathbf{K}_P$  is the gain matrix of a positive-definite value here.

[External Character 4]

$$\mathbf{e} = \mathbf{p}_d - \mathbf{p}$$

The relation of  $\mathbf{e}$  uses Jacobian  $\mathbf{J}_P$  about the joint value of the link location dragged, and is [Equation 6].

$$\mathbf{e} = \mathbf{J}_P^{-1} (\mathbf{p}_d - \mathbf{p})$$

It is expressed. Target rate [outside 5]

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_P^{-1} \dot{\mathbf{p}}_d$$

The general solution of the joint rate [several 1] to realize is calculated by the degree type.

[Equation 7]

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_P^{-1} \dot{\mathbf{p}}_d$$

Feedback control is performed for compensating an integral error here.

Moreover, if a false inverse matrix with weight is used instead of the usual false inverse matrix, "hardness, i.e., the ease of moving," and the difficulty of moving of each joint can be adjusted.

[0047] The count about other constraint is explained. About a formula (7), it is [Equation 8].

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_P^{-1} \dot{\mathbf{p}}_d$$

It rewrites. It is here and is [External Character 6].

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{J}_P^{-1} \dot{\mathbf{p}}_d$$

It comes out. Suppose that the link by which pinning was carried out is expressed with  $NF$  individual, and those locations are expressed with  $r_{Fi}$  ( $i=1, \dots, NF$ ). Moreover, the joint to which the objective function value was given



presupposes that those with ND individual and those target joint values are expressed with  $\theta_D$ . The joint of NL individual exceeds the movable range and suppose that those joint values are expressed with  $\theta_L$ . NL is working - it may change always. Vector  $p_{aux}$  is defined as follows using these.

[Equation 9]

$$p_{aux} = \begin{bmatrix} p_{aux1} \\ p_{aux2} \\ \vdots \\ p_{auxn} \end{bmatrix}$$

[External Character 7]

$$p_{aux} = \begin{bmatrix} p_{aux1} \\ p_{aux2} \\ \vdots \\ p_{auxn} \end{bmatrix}$$

The following relation between joint rates [outside 1] is like a formula (2).

[Equation 10]

$$\dot{p}_{aux} = \begin{bmatrix} \dot{p}_{aux1} \\ \dot{p}_{aux2} \\ \vdots \\ \dot{p}_{auxn} \end{bmatrix}$$

About count of Jaux, it mentions later. The arbitration vector  $y$  is calculated as follows. It is the target rate [outside 8] of  $p_{aux}$  first.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

It calculates by the approach of mentioning later. It is [Equation 11] when a formula (8) is substituted for a formula (10).

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

\*\*\*\*\*. It is here and is [External Character 9].

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

It comes out.

[External Character 10]

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

It deforms into the formula of the easy form below \*\*\*\*\*.

[Equation 12]

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$



Since  $S$  is not necessarily a full rank,  $SR$ -inverse is used in order to solve this equation. If  $SR$ -inverse of  $S$  is expressed as  $S^*$ ,  $y$  is calculable like a degree type.

[Equation 13]

$$\boxed{\times} \text{---}$$

Joint rate [outside 1] \*\*\*\*\* is substituted for a formula (8) and it is obtained, and if it integrates with it further, the joint angle data of each frame will be obtained.

[0048] The count of Jaux mentioned above is explained. When the Jacobian about the joint value of  $rFi$  is expressed with  $JFi$  ( $i = 1, \dots, NF$ ), it is [Equation 14] to all the links by which pinning was carried out.

$$\boxed{\times} \text{---}$$

\*\*\*\*\*. About the joint to which the target joint value was given, it is the rate [outside 11].

$$\boxed{\times} \text{---}$$

\*\*\*\*\* is expressed like a degree type.

[Equation 15]

$$\boxed{\times} \text{---}$$

$JD$  is the matrix from which a  $** (i, j)$  element is set to 0 when other, 1 and here, when the  $i$ -th joint of  $\theta D$  is equivalent to the  $j$ -th joint of  $\theta$ . Similarly, it is [External Character 12].

$$\boxed{\times} \text{---}$$

The relation with \*\*\*\*\* is [Equation 16].

$$\boxed{\times} \text{---}$$

It is expressed.  $JL$  is the matrix from which a  $** (i, j)$  element is set to 0 when other, 1 and here, when the  $i$ -th joint of  $\theta L$  is equivalent to the  $j$ -th joint of  $\theta$ . Summarizing the above matrix, Jaux becomes the following forms.



[Equation 17]

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i,d} - K_{Fi}(\theta_i - \theta_{i,d}) - \ddot{\theta}_{i,d}$$

About the part corresponding to the spherical-surface joint of JFi, JP, and JL, it mentions later.

[0049] [External Character 13] mentioned above

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i,d} - K_{Fi}(\theta_i - \theta_{i,d}) - \ddot{\theta}_{i,d}$$

\*\*\*\*\* is explained. The target rate of the link by which pinning was carried out [outside 14]

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i,d} - K_{Fi}(\theta_i - \theta_{i,d}) - \ddot{\theta}_{i,d}$$

It is calculated by the \*\*\*\* type.

[Equation 18]

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i,d} - K_{Fi}(\theta_i - \theta_{i,d}) - \ddot{\theta}_{i,d}$$

rFiref is the location of a pin and KFi is the gain matrix of a positive-definite value here. The target rate of the joint to which the target joint value was given [outside 15] \*\*,  $\ddot{\theta}_i$

[Equation 19]

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i,d} - K_{Fi}(\theta_i - \theta_{i,d}) - \ddot{\theta}_{i,d}$$

It is calculated. The vector with which thetaDref compared the target joint value here, and KD are the gain matrices of a positive-definite value. The target rate of the joint beyond the movable range is calculated as follows.

[Equation 20]

$$\ddot{\theta}_i = \ddot{\theta}_{i,d} - K_{Fi}(\theta_i - \theta_{i,d}) - \ddot{\theta}_{i,d}$$

thetaLimax and thetaLimin express the maximum and the minimum value of a



joint angle, respectively, and  $K_{Li}$  is forward gain here. A formula (19) and (20) are applicable only to 1 degree-of-freedom joint. The handling of a spherical-surface joint is described below.

[0050] First, the target joint value of a spherical-surface joint is explained. The rotation matrix and angular velocity of  $3 \times 3$  expressed with parent link system of coordinates, respectively define the joint value  $R_i$  of a spherical-surface joint, and joint rate  $\omega_{gai}$ . If target joint value  $R_{Di}^{**} R$   $3 \times 3$  is given to a spherical-surface joint, a target rate will be the following, and will be made and obtained. About the error vector  $e_i$  between the current joint value  $R_i$  and the target joint value  $R_{Di}$ , it is [Equation 21] first.

$$\begin{bmatrix} \times & - \end{bmatrix}$$

It calculates "Be alike."  $\Delta R_i(m, n)$  shows the  $^{**}(m, n)$  element of  $\Delta R_i$  here. Next, it is [Equation 22] about target angular-velocity  $\omega_{gaDi}$ .

$$\begin{bmatrix} \times & - \end{bmatrix}$$

It calculates "Be alike." Here,  $K_{Di}$  is the gain matrix of a positive-definite value. To a spherical-surface joint, it is used instead of a formula (21)-type (23) being a formula (19). The Jacobian which becomes a part of  $J_{Fi}$ ,  $J_D$ , and  $J_L$  corresponding to a spherical-surface joint consists of three trains, and each train corresponds to surrounding rotation of  $x$ , and  $y$  and  $z$ . Each train is calculable like the rotation joint centering on a corresponding direction, respectively.

[0051] Next, the joint movable range of a spherical-surface joint is explained. Since a spherical-surface joint has three degrees of freedom, the movable range is expressed as a field in three-dimension space. It is important for improvement in calculation speed for various approaches to be shown in the expression of a posture and to choose a suitable approach. For example, if the Eulerian angle often used is used for a posture expression, the movable range will become a very complicated configuration for nonlinearity, and calculation speed will fall as a result. Here, how to be easier to understand the



movable range of a spherical-surface joint intuitively, and express it is described. As shown in drawing 4 , the spherical-surface joint movable range is expressed using a total of three parameters which doubled two parameters showing the direction of a link, and one parameter showing a twist angle. The direction of a link in case  $R_i$  is a unit matrix is expressed with a unit vector  $d_{i0}$ . The direction  $d_i$  of an actual link is acquired by rotating  $d_{i0}$  like drawing 5 around the vector  $a_i$  included at a flat surface perpendicular to  $d_{i0}$ . The die length of  $a_i$  is set to  $\sin(\gamma_{mai}/2)$  when an angle of rotation is set with  $\gamma_{mai}$ . The twist angle  $\alpha$  is defined as an angle of rotation required in order to make in agreement with  $R_i$  the frame with which  $R_i$  is obtained from the condition of a unit matrix by rotating around  $a_i$ . As mentioned above, all the postures that a spherical-surface joint can take will be included in the shape of [ of the radius 1 centering on  $d_{i0}$ , and height  $2\pi$  ] a cylinder. In this operation gestalt, it is referred to as  $d_{i0}=(100) T$  to all spherical-surface joints, therefore  $a_i$  is contained in yz side. That is, it is expressed  $a_i=(0ayaz) T$ . Therefore, the movable range becomes the form of the shape of a column which has a shaft parallel to alpha shaft in space like drawing 6 ( $ay$ ,  $az$ ,  $\alpha$ ).  $ay$ ,  $az$ , and  $\alpha$  are calculated as follows. From  $d_{i0}=(100) T$ , it is [Equation 23].

x

It comes out. Therefore,  $ay$  and  $az$  are [Equation 24].

x

It asks. Since system of coordinates after performing rotation of the circumference of  $a_i$ , and the x axis of  $R_i$  are in agreement, the twist angle  $\alpha$  is searched for from the angle which those y-axes and z-axes make. Although a formula (25) and a formula (26) serve as the singular point at the time of  $\gamma_{mai}=\pi$ , since it is usually out of the movable range, it does not become a problem in practice.



[0052] If three parameters corresponding to a certain posture can be found, it will judge whether there is it within movable limits next. Movable range like drawing 6 is efficiently calculable by expressing as a pillar-shaped polyhedron. In this operation gestalt, it is a triangular set and the movable range within an ay-az flat surface is expressed with the upper limit and lower limit of the twist angle alpha, respectively. [ in / for the movable range / each triangular top-most vertices ] The judgment of movable range inside and outside is performed as follows to such a configuration. first, movable, if look for the triangle in which (ay, az0) are contained and it is not found -- it is out of range. When found, it investigates whether it is in a bound further (ay, az, alpha). If a thing out of range movable is understood, the target joint rate [outside 7] for returning it within movable limits will be calculated. Therefore, the criteria posture Rsi is beforehand given to each spherical-surface joint, and target angular-velocity omegaLi for going to Rsi is calculated. This is performed, when Rsi is substituted to RDi of a formula (22) and it substitutes omegaLi to omegaDi of a formula (23), respectively.

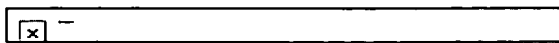
[0053] With the operation gestalt explained so far, it was assumed that the location or target joint value of a pin did not carry out time amount change. However, it is easy to extend so that those time amount change may be included so that it may explain below. By this, the actuation obtained with other means, such as motion capture, can be edited on real time, and new actuation can be generated. The thing which is the need at an escape is following two.

- The location rFiref, rate [outside 16] of the pin in reference movement



It asks by \*\*\*\* kinematics count and a degree type is used instead of a formula (18).

[Equation 25]



- A target joint value and a target joint rate [outside 17]





It carries out, the joint value and joint rate in reference movement are used, and a degree type is used instead of a formula (19).

[Equation 26]



---

## DESCRIPTION OF DRAWINGS

---

[Brief Description of the Drawings]

[Drawing 1] It is drawing showing an example of the human figure skating which generates data of operation with the data generation method of operation by this invention.

[Drawing 2] It is the flow chart of the program which realizes the data generation method of operation by this invention.

[Drawing 3] It is drawing explaining signs that the data generation method of operation by this invention is applied to the human figure skating.

[Drawing 4] It is drawing showing the joint movable range of a spherical-surface joint.

[Drawing 5] It is drawing showing the link parameter of a spherical-surface joint in graph.

[Drawing 6] (ay, az, alpha) It is drawing showing the movable range of the solid sphere joint projected on space.

[Description of Notations]

1, 14, 15 External interface

2 Orbital Data

3 General Solution - Null Space Count Section

4 Target Joint Rate Count Section

5 Optimization Count Section

6 Integral Section



- 7 Movement Data
  - 8 Fixed Position Data
  - 9 Joint Location Data
  - 10 Movable Range Data
  - 11 The Orbital Appointed Link Select Data
  - 12 Fixed Link Select Data
  - 13 The Existing Movement Data
  - 16 File
  - 17 Screen Display
-